

ВАКУУМНЫЙ ПРИВОД С ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Д.С. Шахов, В.П. Михайлов, А.М. Базиненков, М.Е. Жуков.

АННОТАЦИЯ

К современному вакуумному оборудованию предъявляются чрезвычайно жесткие требования по точности обеспечения параметров движения объекта. Тонкие пленки, нанесенные в вакууме, используются в качестве антифрикционных покрытий режущего инструмента и машиностроительных пар трения. Для обеспечения равномерности нанесенной пленки часто необходимо осуществлять перемещение с высокой точностью позиционирования и равномерностью скорости. Наиболее эффективное управление скоростью движения осуществляется в пневматических и гидравлических приводах.

В работе рассмотрен вакуумный привод с электрореологическим управлением, способный с высокой точностью совершать перемещения. Это достигается за счет применения в качестве рабочей жидкости гидравлической части интеллектуального материала, электрореологической жидкости, способной мгновенно изменять свои реологические свойства под действием внешнего электрического поля.

В работе обнаружена проблема низкой эффективности регулировки скорости на больших скоростях перемещения привода.

Определены возможные причины низкой эффективности регулировки скорости с помощью гидродинамического расчёта на высоких скоростях штока привода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ВАКУУМ, ПРИВОД, ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЖИДКОСТЬ, СКОРОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ГИДРАВЛИКА, ДРОССЕЛЬ, РАСХОД

VACUUM DRIVE WITH ELECTORRHEOLOGICAL CONTROLS

D.S. Shakhov, V.P. Mikhailov, A.M. Bazinenkov, M.E. Zhukov.

ABSTRACT

Extremely strict requirements are imposed on modern vacuum equipment for the accuracy of ensuring the parameters of the object's movement. Thin films deposited in vacuum are used as antifriction coatings of cutting tools and machine-building friction pairs. To ensure the uniformity of the applied film, it is often necessary to move with high positioning accuracy and uniformity of speed. The most effective speed control is carried out in pneumatic and hydraulic drives.

The paper considers a vacuum drive with electrorheological control, capable of making movements with high accuracy. This is achieved through the use as a working fluid of the hydraulic part of the intelligent material, an electrorheological fluid capable of instantly changing its rheological properties under the influence of an external electric field.

The paper reveals the problem of low efficiency of speed adjustment at high speeds of the drive movement.

The possible reasons for the low efficiency of speed adjustment using hydrodynamic calculation at high speeds of the drive rod are determined.

KEYWORDS

VACUUM, DRIVE, ELECTORRHEOLOGICAL FLUID, MOVEMENT SPEED, HYDRAULICS

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная технологическая среда требуется для осуществления большинства нанотехнологических процессов.

Линейный привод используется в нанотехнологическом оборудовании как для загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий, так и для перемещений изделий и инструмента в процессе технологического воздействия. Для обеспечения требований обработки часто необходимо осуществлять перемещение с постоянной скоростью или по определенному закону и поддерживать необходимую скорость с высокой точностью, например, при сканировании координатных столов во время электронной, ионной и лазерной обработки. Наиболее эффективное управление скоростью движения осуществляется в пневматических и гидравлических приводах.

Высокая точность на гидравлическом приводе можно получить за счёт применения в качестве рабочей жидкости электрореологической жидкости (ЭРЖ).

ЭРЖ относятся к классу интеллектуальных материалов, которые являются суспензиями непроводящих твердых частиц поляризующихся материалов, распределенных в диэлектрической жидкости. В отсутствии электрического поля ведут себя как ньютоновские жидкости.

При приложении электрического поля практически мгновенно происходит резкое (вплоть до 100000 раз) увеличение вязкости за счет образования цепочечных структур, направленных параллельно силовым линиям электрического поля. Помимо вязкости меняются упругость и пластичность жидкости.

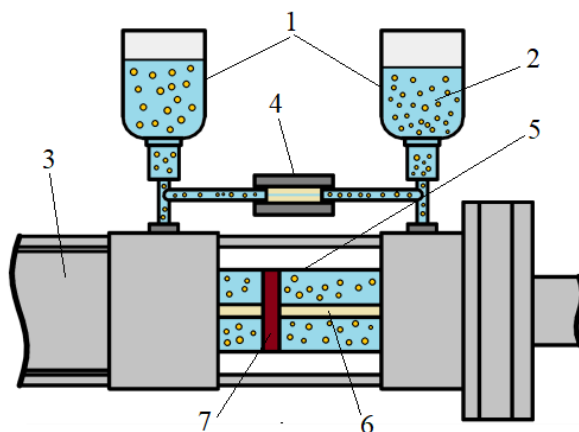
В настоящее время ЭРЖ активно изучаются в мире, большинство исследований направлены на подбор дисперсной фазы суспензии, обеспечивающей максимальный электрический эффект, при приложении внешнего электрического поля [2,3,4].

В работе предлагается в качестве дисперсной фазы ЭРЖ использовать крахмал индикатор чда ГОСТ 10163-76 [1,5].

В вакуумной технологической среде может быть успешно применен пневмогидравлический привод с ЭР управлением. Рабочей средой его гидравлической части (рис. 1) выступает ЭРЖ.

Возвратно поступательные движения проходного штока 6 задаются пневматической частью привода 3. Пневматическая и гидравлическая части имеют единый шток. На штоке жестко закреплен поршень 7, который совершает движение внутри гидроцилиндра 5. Рабочая жидкость 2 привода перетекает из одной полости цилиндра в другую через ЭРД 4. Запас ЭРЖ хранится в емкостях 1.

При приложении внешнего электрического поля в рабочем зазоре дросселя образуются цепочные структуры по направлению линий электрического поля за счёт электрореологического эффекта. В результате создается гидравлическое сопротивление в рабочем зазоре ЭРД, снижается расход жидкости через ЭРД и повышается перепад давлений на нём. Таким образом осуществляется уменьшение скорости движения штока привода.

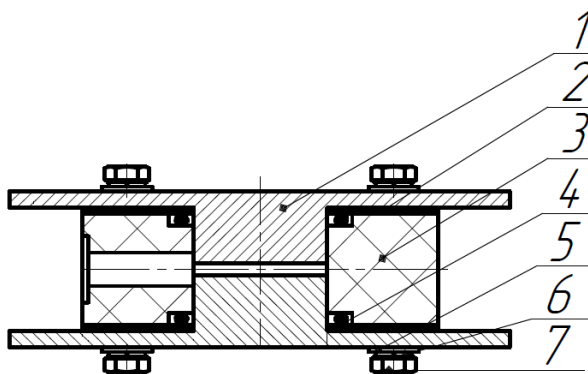


1 – емкости с ЭР жидкостью; 2 – исследуемая жидкость; 3 – пневмоцилиндр; 4 – ЭРД; 5 – гидроцилиндр; 6 – шток; 7 – поршень гидроцилиндра;
Рис. 1. Схема гидравлического узла привода с ЭР управлением

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования в работе проводились на атмосферном однокоординатном пневмогидравлическом приводе с ЭР управлением, имитирующем одну из координат вакуумного привода с электроореологическим управлением. [1]

Основным управляющим элементом экспериментального привода является электроореологический дроссель (рис. 2). Дроссель служит для создания гидравлического сопротивления в магистрали, соединяющей полости гидроцилиндра, за счёт образования цепочных структур в ЭРЖ под действием внешнего электрического поля, создаваемого между электродами.



1 - электрод; 2 – рабочий зазор; 3 - изолятор; 4 - уплотнение;
5 - регулировочная пластина; 6 - шайба; 7 - винт;
Рис. 2. Схема электроореологического дросселя

В предыдущей работе [1] исследовалась эффективность регулировки скорости штока пневмогидравлического привода за счёт ЭРЖ на основе крахмала. Было обнаружено, что с ростом напряжения на обкладках ЭРД скорость штока экспериментального привода уменьшалась, что говорит о значительном влиянии ЭР эффекта на перемещение штока привода.

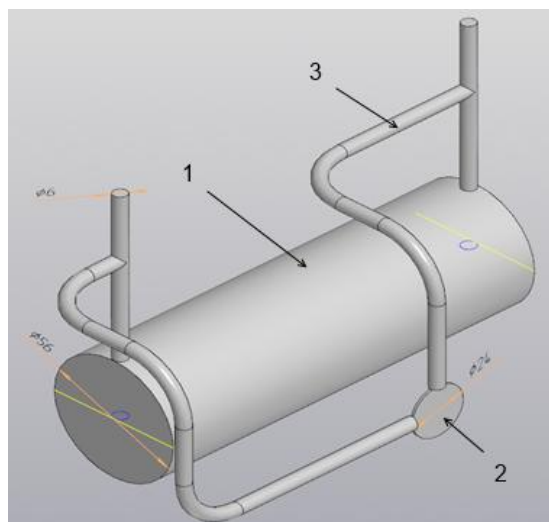
Однако, при давлениях в движущем пневмоцилиндре более 0,4 атм эффективность регулировки скорости резко снижалась.

Целью настоящей работы является определение эффективности новых образцов ЭРЖ при давлениях в пневмоцилиндре выше 0,4 атм, а также моделирование течения жидкости в рабочем зазоре дросселя и определение полей распределения скоростей течения посредством гидродинамического расчёта в САПР методом конечных элементов.

При различных давлениях в пневмоцилиндре и напряжениях на обкладках дросселя проводилось измерение положения штока и мониторинг разности давлений.

В работе представлены исследования образцов суспензии с концентрацией дисперсной фазы крахмала 25 %, ПАВ 4% от массы крахмала. Дисперсионной средой послужила кремнийорганическая жидкость ПМС-20.

Для гидродинамического расчёта в САПР была выбрана несжимаемая жидкость, ламинарный режим течения. Жидкостью принята ПМС-20, с параметрами ($\rho = 950 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0,019 \text{ Па}\cdot\text{с}$), скорость штока была принята максимальная для привода 200 мм/с. Расчёт проводился пренебрегая сопротивлениями плавных поворотов и перепадом высоты. Текущая жидкость принята ньютоновской, что соответствует ЭР жидкости без воздействия поля. Упрощенная модель каналов представлена на рис. 3.



1 – гидроцилиндр; 2 – ЭР дроссель; 3 – трубопроводы
Рис. 3. Схема гидроцилиндра и ЭР дросселя

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученная зависимость координаты от времени была пересчитана в скорость перемещения штока методом дифференцирования. В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости скорости перемещения штока от напряжения на обкладках ЭРД для образца ЭРЖ. Графики для давления в пневмоцилиндре 0,5 атм и 0,6 атм представлены на рис. 3.

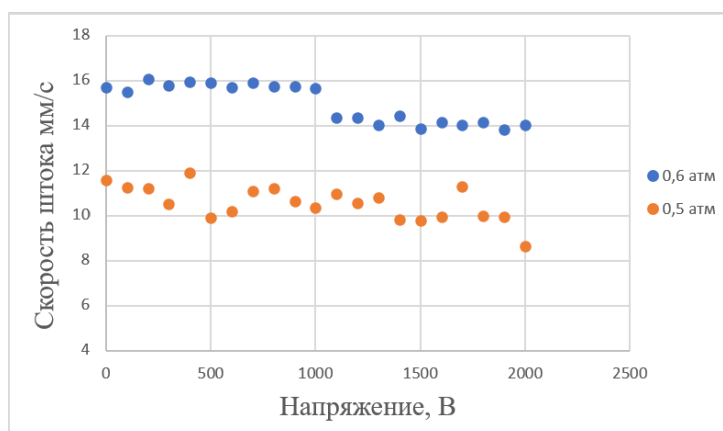


Рис. 3. График зависимости скорости от напряжения для давлений 0,5 и 0,6 атм

Обнаружено, что с ростом напряжения на обкладках ЭРД происходит снижение скорости движения штока. Для давления в пневмоцилиндре 0,5 атм с ростом напряжения от 0 до 2000 В скорость снижается на 25%, а для давления 0,6 атм снижение скорости составляет 11%, в то время как при давлении в приводе 0,4 атм скорость снижается на 75% [1].

Возможными причинами снижения эффективности регулировки может быть высокая скорость течения ЭРЖ в рабочем зазоре, не позволяющая образовываться цепочным структурам, а также низкая седиментационная устойчивость рабочей жидкости. Для выявления причин проведен гидродинамический расчёт ЭРД методом конечных элементов, который показал, что скорости течения жидкости в рабочем канале дросселя достигают 140 м/с. На рис.4. представлены результаты расчета в САПР Comsol скорости ламинарного течения ЭРЖ в канале гидравлической части и непосредственно в ЭРД.

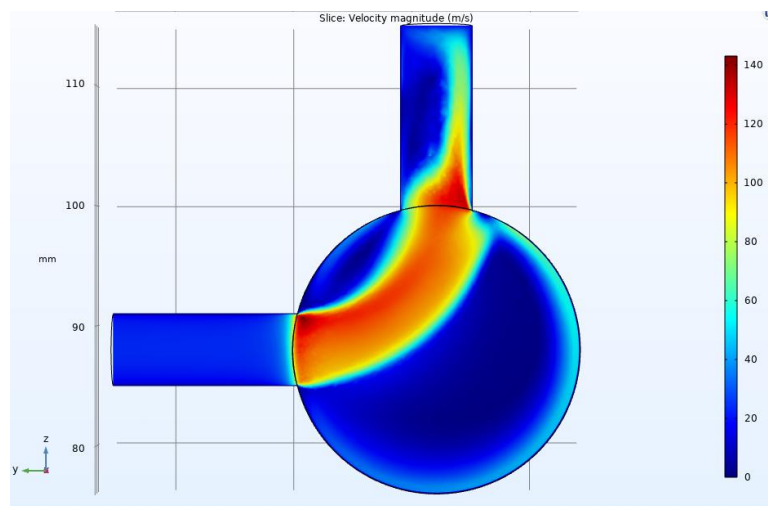


Рис.4. Схема распределения скоростей в ЭРД

Результаты гидравлического расчета показали, что скорость течения ЭР жидкости в зазоре дросселя и в поперечном сечении трубопровода распределена неравномерно вследствие углового расположения трубопроводов, поэтому такая компоновка не является оптимальной. В дальнейшем рекомендуется использовать прямопроточный ЭР дроссель.

Полученное распределение соответствует положениям механики жидкости и газа. Профиль течения соответствует течению ньютоновской жидкости, скорости жидкости около стенки минимальна, наибольшая скорости достигается на оси цилиндрического трубопровода. Обнаружена большая застойная зона, в которой, скорее всего, происходит расслоение суспензии и застой дисперсной фазы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость перемещения штока пневмогидравлического привода изменяется за счет электрореологического эффекта в ЭРЖ, происходящим в рабочем зазоре ЭРД. Образовавшиеся цепочные структуры дисперсной фазы увеличивают локально эквивалентную вязкость суспензии, что приводит к росту гидравлического сопротивления данного участка трубопровода между полостями гидроцилиндра и снижению скорости движения штока.

При давлениях в пневмоцилиндре порядка 0,5 атм скорость течения жидкости в канале достигает 140 м/с, что приводит к снижению прочности цепочных структур в рабочем зазоре за счет разрушения структур на стадии формирования высоким потоком ЭРЖ и приводит к уменьшению эффективности регулировки скорости. Полученное поле течения жидкости в рабочем зазоре дросселя указывает на участки малой скорости течения жидкости, в которых из-за слабой седиментационной устойчивости происходит оседание дисперсионной фазы суспензии.

Осадок, образовавшийся в данной зоне, со временем закупоривает рабочий зазор ЭРД и приводит к возрастанию скорости течения жидкости в нём и снижению концентрации дисперсной фазы рабочей жидкости.

ВЫВОДЫ

1. Механизм перемещения с электрореологической регулировкой скорости может быть успешно применен в вакуумной технологической среде за счёт применения герметизаторов сварных сильфонов или тонкостенных резиновых оболочек.

2. На скоростях движения привода свыше 120 мм/с, соответствующему давлению 0,5 атм в пневматической магистрали эффективность регулировки скорости привода снижается за счёт увеличения скорости седиментации жидкости, а также высокой скорости течения жидкости в рабочем зазоре.

3. Гидродинамический расчёт методом конечных элементов показал, что максимальная скорость жидкости в рабочем зазоре дросселя достигает 140 м/с. Это приводит к вымыванию цепочных структур на стадии их формирования под действием электрического поля. Расчёт также показал наличие застойных зон в рабочем зазоре ЭРД, в которых происходит более интенсивная седиментация частиц дисперсной фазы. В результате снижается объемная концентрация частиц в суспензии и увеличивается вероятность засорения канала дросселя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахов Д.С., Михайлов В.П., Базиненков А.М., Жуков М.Е. Вакуумный двухкоординатный механизм перемещений с электрореологической регулировкой скорости. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 2. С. 144–148.
<https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.144.148>
2. Lan Y.C., Huang C.K., Men S.Q., Lu K.Q. Experimental investigation of the frequency dependence of the electrorheological effect. *Physical Review E*. 2004. 70:021507.
3. Yavuz M., Unal H.I., Yildirim Y. Electrorheological Properties of Suspensions Prepared from Polystyrene-Block- Polyisoprene Copolymer. *Turkish Journal of Chemistry*, 2001, 25(1), 19-32.
4. Agafonov A.V., Kraev A.S., Gerasimova T.V., Evdokimova O.L., Shekunova T.O., Baranchikov A.E., Borilo L.P., Ivanova O.S. Kozik V.V., Ivanov V.K. Properties of Electrorheological Fluids Based on Nanocrystalline Cerium Dioxide // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2017, 62(5), 625-632.
5. Шахов Д.С. Исследование седиментационной устойчивости электрореологической жидкости. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 4 – 8 апреля, 2022, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2022.– URL: studvesna.ru?go=articles&id=3558 (дата обращения: 15.04.2023)
6. Николаев М.А., Базиненков А.М., Михайлов В.П. Обеспечение заданного закона перемещения вакуумных механизмов за счет применения электрореологического регулятора скорости // Материалы XIX научно-технической В14 конференции. «Вакуумная наука и техника». г. Судак. 2012. С. 349.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шахов Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры МТ-11 (ORCID: 0000-0003-1113-0428).
ФБГОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ). e-mail: shakhovds@student.bmstu.ru

Михайлов Валерий Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры МТ-11 (ORCID: 0000-0003-3638-7932). ФБГОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ). e-mail: mikhailov@bmstu.ru

Базиненков Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-11 (ORCID: 0000-0003-0845-2290). ФБГОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ). e-mail: ambazinenkov@bmstu.ru

Жуков Михаил Евгеньевич – студент 4го курса кафедры МТ-11 (ORCID: 0000-0001-6522-1304). ФБГОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ). e-mail: zhukovme@student.bmstu.ru